

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
  - TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
  - FADED TEXT
  - ILLEGIBLE TEXT
  - SKEWED/SLANTED IMAGES
  - COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
  - GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 847 051**

②1 N° d'enregistrement national : **02 14108**

⑤1 Int Cl<sup>7</sup> : G 06 F 17/50, G 06 T 17/20 // H 04 R 5/02

⑫

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

**A1**

②2 Date de dépôt : 12.11.02.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 14.05.04 Bulletin 04/20.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS Etablissement  
public à caractère scientifique et technologique — FR,  
ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN — FR,  
UNIVERSITE PARIS SUD — FR et UNIVERSITY OF  
ARIZONA — US.*

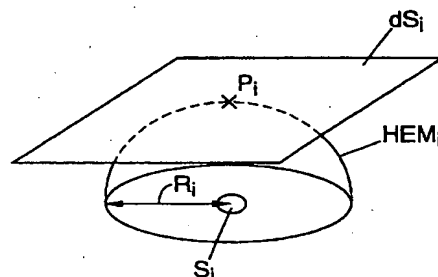
⑦2 Inventeur(s) : PLACKO DOMINIQUE, LIEBEAUX  
NICOLAS et KUNDU TRIBIKRAM.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : CABINET PLASSERAUD.

⑤4 PROCÉDE POUR EVALUER UNE GRANDEUR PHYSIQUE REPRESENTATIVE D'UNE INTERACTION ENTRE  
UNE ONDE ET UN OBSTACLE.

⑤7 L'invention concerne la modélisation des interactions  
entre une onde incidente et un obstacle, notamment dans le  
domaine du contrôle non destructif. Selon l'invention, on  
maille la surface de l'obstacle et l'on attribue au moins une  
source ( $S_i$ ) à chaque élément de surface ( $dS_i$ ). On calcule  
ensuite des conditions aux limites en chaque maille de  
l'obstacle et l'on en déduit des valeurs de source. A partir  
d'une matrice d'interaction et de ces valeurs de sources, on  
estime une grandeur physique représentative de l'interac-  
tion entre l'onde et l'obstacle, en tout point de l'espace.



FR 2 847 051 - A1



Procédé pour évaluer une grandeur physique représentative  
d'une interaction entre une onde et un obstacle

L'invention concerne la modélisation des interactions  
5 entre une onde incidente et un obstacle de cette onde,  
notamment dans le domaine du contrôle non destructif.

La modélisation des interactions entre une onde et un  
obstacle recevant cette onde, tel qu'une cible placée dans  
10 la zone sensible d'un capteur, trouve une application  
avantageuse en contrôle non destructif.

On connaît un procédé de modélisation dit "par éléments  
finis" consistant à appliquer un pavage de l'espace  
15 tridimensionnel entourant l'obstacle et à évaluer les  
interactions précitées pour tous les pavés de l'espace.

Les procédés de calcul par "éléments finis" apportent une  
résolution à un problème posé sous forme d'équations  
20 différentielles partielles. Ils se fondent sur une  
représentation de l'espace d'étude par un assemblage  
d'éléments finis, à l'intérieur desquels des fonctions  
d'approximations sont déterminées en termes de valeurs  
nodales de la grandeur physique recherchée. Le problème  
25 physique continu devient donc un problème discret aux  
éléments finis où les grandeurs nodales sont les nouvelles  
inconnues. De tels procédés cherchent donc à approcher la  
solution globale, plutôt que les équations aux dérivées  
spatiales partielles de départ.

La discrétisation de l'espace pris en compte assure que ce dernier soit entièrement recouvert par des éléments finis (lignes, surfaces ou volumes), cette opération porte le nom de "maillage" dans l'espace bidimensionnel (2D) ou de "pavage" dans l'espace tridimensionnel (3D). Les éléments mis en jeu sont soit rectangulaires ou triangulaires en 2D, soit parallélépipédiques ou tétraédriques en 3D. Ils peuvent être de tailles différentes, répartis uniformément sur la surface ou non.

10

En général, la grandeur physique recherchée, telle qu'un potentiel électrostatique ou une valeur de pression, est connue sur la frontière du domaine. Cette frontière peut être fictive. On y impose des conditions aux limites. Le potentiel est donc inconnu à l'intérieur du même domaine. On définit alors un nœud comme étant un sommet d'un élément. Les inconnues du problème sont donc les valeurs du potentiel en chaque nœud de l'ensemble du domaine.

20

A titre d'illustration, la figure 6 de l'art antérieur représente un exemple de surface, constituée par deux matériaux M1 et M2, de propriétés électromagnétiques différentes, et maillée par des éléments triangulaires comportant chacun trois nœuds  $A_i$ ,  $B_i$  et  $C_i$ . L'ensemble du domaine est délimité par une frontière F.

25

Une fois le maillage défini, plusieurs approches existent pour transformer la formulation physique du problème en une modélisation discrète aux éléments finis. Si le problème est formulé par des équations différentielles et consiste à minimiser une fonctionnelle, on applique

30

généralement une méthode variationnelle. Cette transformation aboutit à une formulation matricielle dont la résolution donne les solutions nodales, les solutions aux points non nodaux étant obtenues par interpolation  
5 linéaire.

Néanmoins, de tels calculs, en trois dimensions, requièrent des ressources informatiques importantes et génèrent des temps de calcul très longs, en dépit de  
10 l'accroissement des performances de logiciels permettant d'implémenter ces calculs.

Certes, les problèmes 2D, souvent simplifiés par des conditions de symétrie avantageuses pour ne modéliser  
15 qu'une partie de la géométrie, se résolvent rapidement. Mais il n'en est rien pour les problèmes 3D, qui sont les plus fréquents. La figure 6 montre combien la finesse du maillage, c'est à dire le rapport entre la taille d'un élément et celle du plus petit détail du domaine, fait  
20 croître le nombre de nœuds.

En conséquence, la quantité d'équations et d'inconnues augmente proportionnellement, et, de là, le temps de calcul nécessaire à la résolution du problème. Il est  
25 important de préciser que la génération du maillage, à savoir la discrétisation de l'espace de travail, et la génération de la liste des nœuds consomme un temps de calcul supérieur à celui nécessaire à la résolution du problème.

30

La présente invention vient améliorer la situation.

Elle propose à cet effet un procédé pour évaluer une grandeur physique associée à une interaction entre une onde et un obstacle, dans une région de l'espace tridimensionnel, dans lequel :

5 a) on détermine, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface dont une partie au moins représente la surface d'un obstacle recevant une onde principale et émettant, en réponse, une onde secondaire, et l'on attribue à chaque échantillon de surface au moins 10 une source émettant une onde élémentaire représentant une contribution à ladite onde secondaire,

b) on forme un système matriciel comportant :

15 - une matrice d'interaction, inversible, appliquée à une région donnée de l'espace et comportant un nombre de colonnes correspondant à un nombre total de sources,

20 - une première matrice colonne dont chaque coefficient est associé à une source et caractérise l'onde élémentaire qu'elle émet,

- et une seconde matrice colonne, obtenue par une multiplication de la première matrice colonne par la matrice d'interaction et dont les coefficients sont des valeurs d'une grandeur physique représentative de l'onde émise par l'ensemble des sources en ladite 25 région donnée,

c) pour estimer les coefficients de la première matrice colonne, on affecte des valeurs de grandeur physique choisies à des points prédéterminés, associés chacun à un échantillon de surface, lesdites valeurs choisies étant 30 rangées dans la seconde matrice colonne, et l'on multiplie

cette seconde matrice colonne par l'inverse de la matrice d'interaction appliquée auxdits points prédéterminés,

d) pour évaluer ladite grandeur physique représentant l'onde émise par l'ensemble des sources dans une région donnée de l'espace tridimensionnel, on applique la matrice d'interaction à ladite région donnée et on multiplie cette matrice d'interaction par la première matrice colonne comportant les coefficients estimés à l'étape c).

10 Ainsi, selon l'un des avantages que procure la présente invention, l'étape de maillage a) ne concerne qu'une ou plusieurs surfaces, tandis que le procédé de modélisation de type "par éléments finis" nécessite un pavage de tout l'espace avoisinant l'obstacle, ce qui permet de réduire, 15 dans la mise en œuvre du procédé selon l'invention, les ressources mémoires et les temps de calcul nécessaires.

Le procédé selon l'invention s'applique aussi bien à une onde principale émise par une source lointaine qu'à une 20 onde principale émise en champ proche.

Avantageusement, pour évaluer une grandeur physique représentative d'une interaction entre un élément rayonnant une onde principale en champ proche et un 25 obstacle recevant cette onde principale,  
- à l'étape a), on détermine en outre, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface représentant ensemble une surface active de l'élément rayonnant l'onde principale, et l'on attribue à chaque échantillon de la 30 surface active au moins une source émettant une onde

élémentaire représentant une contribution à ladite onde principale,

- on applique les étapes b), c) et d) aux échantillons de la surface active, et

- 5 - on évalue ladite grandeur physique représentant l'interaction entre l'élément rayonnant et l'obstacle dans une région donnée de l'espace tridimensionnel, en prenant en compte la contribution, en ladite région donnée, de l'onde principale émise par l'ensemble des sources de la surface active et la contribution de l'onde secondaire  
10 émise par l'ensemble des sources de la surface de l'obstacle.

On entend par les termes "élément rayonnant" aussi bien un  
15 émetteur de l'onde principale, tel qu'un générateur d'ondes, qu'un récepteur de l'onde principale, tel qu'un capteur de cette onde.

Dans un premier mode de réalisation, la grandeur physique  
20 à évaluer est une grandeur scalaire et, à l'étape a), on attribue une source unique à chaque échantillon de surface.

Dans un second mode de réalisation, la grandeur physique à  
25 évaluer est une grandeur vectorielle exprimée par ses trois coordonnées dans l'espace tridimensionnel, et on attribue, à l'étape a), trois sources à chaque échantillon de surface.

30 Dans une réalisation avantageuse, pour estimer, à l'étape d), la contribution de l'onde secondaire dans la région



donnée de l'espace, les valeurs de grandeur physique choisies à l'étape c) sont fonction d'un coefficient prédéterminé de réflexion et/ou de transmission de l'onde principale par chaque échantillon de surface de l'obstacle.

Ainsi, on comprendra que l'onde secondaire peut aussi bien correspondre à une réflexion de l'onde principale, qu'à une transmission de l'onde principale, ou encore à une diffraction de l'onde principale. Dans cette réalisation avantageuse, l'étape c) correspond finalement à une détermination des conditions aux limites à la surface de l'obstacle, en tant qu'interface entre deux milieux distincts notamment dans une hétérostructure.

Par ailleurs, pour un contrôle non destructif d'une cible formant un obstacle d'une onde principale, on attribue un coefficient de réflexion ou de transmission choisi à tous les points prédéterminés de la surface de la cible, et on compare une simulation obtenue par la mise en œuvre du procédé au sens de l'invention avec une mesure expérimentale. Ainsi, les points de la surface de la cible qui, dans la mesure expérimentale, ne vérifient pas la simulation correspondent à des inhomogénéités ou à des impuretés sur la surface de la cible.

Dans une autre approche, on connaît les propriétés globales de l'obstacle, notamment en transmission et/ou en réflexion. Par la mise en œuvre du procédé de l'invention, on optimise alors la position dans l'espace d'un capteur ou même la forme de ce capteur, pour une application à un

contrôle non destructif, ce capteur étant destiné à analyser une cible formant un obstacle de l'onde principale.

- 5 A cet effet, dans une réalisation avantageuse, on compare une pluralité de valeurs de la grandeur physique estimée à l'étape d) du procédé au sens de l'invention, obtenues pour une pluralité de régions de l'espace, pour sélectionner une région candidate pour la disposition d'un  
10 élément rayonnant destiné à interagir avec l'obstacle.

Comme indiqué ci-avant, on entend par les termes "élément rayonnant" aussi bien un capteur qu'un générateur de l'onde. On comprendra ainsi que l'optimisation de la  
15 position de l'élément rayonnant peut s'appliquer aussi à l'optimisation de la disposition ou de la forme d'un générateur d'ondes. Par exemple, la présente invention trouve encore une application avantageuse à la disposition de haut-parleurs dans un volume fermé, délimité par des  
20 obstacles, comme par exemple l'habitacle d'un véhicule automobile.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée ci-après, et des dessins annexés sur lesquels :  
25

- la figure 1A représente schématiquement les surfaces respectives d'un élément rayonnant ER émettant une onde et d'un obstacle OBS recevant cette onde, maillées en vue d'évaluer une grandeur scalaire représentative de  
30 l'onde en un point M de l'espace tridimensionnel ;

- la figure 1B représente en détail un échantillon de surface  $dS_i$  correspondant à une maille de la figure 1A, ainsi qu'une source  $S_i$  associée à l'échantillon de surface  $dS_i$  ;
- 5 - la figure 2A représente schématiquement les surfaces respectives d'un élément rayonnant ER émettant une onde et d'un obstacle OBS recevant cette onde, maillées en vue d'évaluer une grandeur vectorielle représentative de l'onde en un point M de l'espace tridimensionnel ;
- 10 - la figure 2B représente en détail un échantillon de surface  $dS_i$  correspondant à une maille de la figure 2A, ainsi que trois sources associées  $SA_i$ ,  $SB_i$  et  $SC_i$  ;
- la figure 2C représente, en vue de face, une surface maillée dont chaque échantillon de surface comporte  
15 trois sources  $SA_i$ ,  $SB_i$  et  $SC_i$ , pour l'estimation d'une grandeur vectorielle ;
- la figure 3A représente, à titre illustratif, les armatures d'un condensateur, de potentiels électriques respectifs  $V1$  et  $V2$ , pour l'estimation d'un potentiel  
20 électrique au point M de l'espace tridimensionnel, à chaque échantillon de surface  $dS_i$  de la figure 3A étant associée une unique source  $S_i$  ;
- la figure 3B représente, à titre illustratif, les armatures d'un condensateur, de potentiels électriques respectifs  $V1$  et  $V2$ , pour l'estimation d'un champ  
25 électrique  $\vec{E}(M)$ , au point M de l'espace tridimensionnel, à chaque échantillon de surface  $dS_i$  de la figure 3B étant associée trois sources  $SA_i$ ,  $SB_i$  et  $SC_i$  ;

- la figure 4A représente, comme les figures 1A et 2A, une interaction entre un élément rayonnant ER et un obstacle OBS, pour évaluer une grandeur physique (scalaire ou vectorielle) en un point M dans une portion de l'espace délimitée par la surface de l'élément rayonnant et la surface de l'obstacle, ce point de l'espace M recevant à la fois l'onde émise par l'élément rayonnant et l'onde réfléchie par l'obstacle ;
- 10 - la figure 4B, complémentaire de la figure 4A, représente une transmission par l'obstacle OBS de l'onde émise par l'élément rayonnant ER, en un point M d'un demi-espace délimité par le plan que forme la surface de l'obstacle OBS ;
- 15 - la figure 5A représente schématiquement un obstacle OBS, de dimensions finies, avec des sources associées aux échantillons de surface agencées pour estimer une grandeur représentative d'une réflexion de l'onde sur l'obstacle ;
- 20 - la figure 5B, en complément de la figure 5A, représente schématiquement un obstacle OBS, de dimensions finies, avec les sources associées aux échantillons de surface disposées pour estimer une grandeur représentative de la transmission de l'onde par l'obstacle ;
- 25 - la figure 5C représente une simulation d'une onde ultrasonore émise par un élément rayonnant ER et se propageant vers un obstacle OBS ; et
- la figure 6 représente un maillage de milieux tridimensionnels, pour l'application d'un procédé de calcul par "éléments finis", au sens de l'état de la
- 30 technique.

On se réfère tout d'abord à la figure 1A, sur laquelle la surface d'un obstacle OBS, recevant une onde, est maillée selon une pluralité d'échantillons de surface  $dS_1$  à  $dS_4$ ,  
5 conformément à l'étape a) précitée.

En se référant à la figure 1B, à chaque échantillon de surface  $dS_1$  est associé un hémisphère  $HEM_1$ , tangent à l'échantillon de surface  $dS_1$  en un point de contact  $P_1$ .  
10 Préférentiellement, ce point de contact  $P_1$  correspond au sommet de l'hémisphère  $HEM_1$ . Pour l'estimation d'une grandeur physique scalaire au point M (tels qu'un potentiel électrostatique, une pression acoustique ou autre), une source unique  $S_1$  est associée à l'échantillon  
15 de surface  $dS_1$ . Comme on le verra plus loin, dans le cas de l'estimation d'une grandeur vectorielle dans un point de l'espace M, on affectera plutôt trois sources à chaque échantillon de surface  $dS_1$ .

20 Préférentiellement, l'hémisphère  $HEM_1$  est construit comme décrit ci-après. Pendant l'étape de maillage a) précitée, on évalue, d'une part, la surface de l'obstacle OBS et, d'autre part, on choisit un nombre d'échantillons de surface  $dS_1$  selon la précision souhaitée de l'estimation  
25 de la grandeur physique au point M. Ainsi, la surface d'un échantillon  $dS_1$  est donnée par  $S_0/N$ , où  $S_0$  correspond à la surface totale de l'obstacle et N correspond au nombre choisi d'échantillons de surface  $dS_1$ .

L'hémisphère  $HEM_i$  est de même surface que l'échantillon  $dS_i$ . Ainsi, le rayon  $R_i$  de l'hémisphère se déduit de l'expression :

$$2\pi R_i^2 = \frac{S_0}{N}$$

5

Chaque maille que représente un échantillon de surface  $dS_i$  présente, dans l'exemple décrit, une forme de parallélogramme, de centre  $P_i$  correspondant au point d'intersection des diagonales de ce parallélogramme.

10

L'hémisphère  $HEM_i$  est tangent à l'échantillon de surface  $dS_i$  en ce point  $P_i$ . Bien entendu, les mailles peuvent être de forme différente, triangulaire ou autre. On indique de façon générale que le point  $P_i$  correspond au barycentre de la maille.

15

On définit ainsi la position de la source  $S_i$  (située au centre de l'hémisphère  $HEM_i$ ). La distance séparant la source  $S_i$  du point de contact  $P_i$  correspond au rayon  $R_i$  de l'hémisphère  $HEM_i$  et la droite qui passe par les points  $P_i$  et  $S_i$  est orthogonale à la maille  $dS_i$ .

20

Dans l'exemple représenté sur la figure 1A, on maille en outre la surface d'un élément rayonnant ER, correspondant par exemple à un générateur d'ondes. A chaque maille de la surface de l'élément rayonnant est associé un échantillon de surface  $dS'_i$ , comme on le verra plus loin.

25

Le système matriciel que l'on met en forme à l'étape b) précitée correspond à :

30

$$\begin{pmatrix} V(M_1) \\ V(M_2) \\ \vdots \\ V(M_N) \end{pmatrix} = F \times \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} \quad [1]$$

où :

- les coefficients  $v_j$  (avec  $j=1,2,\dots,N$ ) de la première  
5 matrice colonne correspondent à des valeurs associées  
chacune à une source, telle qu'une charge électrique  
(dans le cas de l'estimation d'un potentiel  
électrique), ou encore à un flux magnétique (dans le  
cas de l'estimation d'un potentiel magnétique), ou  
10 encore à une vitesse sonore (dans le cas de  
l'estimation d'une pression acoustique liée à la  
propagation d'une onde sonore) ;
- les coefficients  $V(M_i)$  (avec  $i=1,2,\dots,N$ ) de la seconde  
matrice colonne correspondent chacun à une valeur de la  
15 grandeur physique (un potentiel électrique ou  
magnétique ou une pression) à estimer en un point  $M_i$  de  
l'espace ;
- la matrice d'interaction  $F$  comporte des coefficients  
 $C_{i,j}$  dont l'expression générale est donnée par :

20

$$C_{i,j} = f(M_i S_j) \quad [2]$$

On comprendra ainsi que les coefficients de la matrice  $F$   
sont des coefficients d'interaction qui dépendent de la  
25 distance séparant chaque point de l'espace  $M_i$  d'une source  
 $S_j$  associée à une maille  $dS_j$ .

Dans le cas de la propagation d'une onde électrique, les coefficients  $C_{i,j}$ ,  $v_j$  et  $V(M_i)$ , respectivement de la matrice d'interaction de la première et de la seconde matrice colonne, sont donnés par :

$$C_{i,j} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 \overline{M_i S_j}}$$

$$v_j = q_j \quad [3]$$

$$V(M_i) = U_i$$

où :

- $\epsilon_0$  est une constante diélectrique,
- $\overline{M_i S_j}$  est une distance mesurée en valeur algébrique,
- 10 -  $q_j$  correspond à une charge électrique caractérisant une source  $S_j$ , et
- $U_i$  correspond à un potentiel électrique au point  $M_i$ .

Dans le cas de la propagation d'une onde magnétique,  
15 l'expression de ces coefficients est la suivante :

$$C_{i,j} = \frac{1}{2\pi\mu_0 \overline{M_i S_j}}$$

$$v_j = \varphi_j \quad [4]$$

$$V(M_i) = \theta_i$$

où :

- 20 -  $\mu_0$  correspond à la perméabilité magnétique du milieu où se situe le point  $M_i$ ,



- $\varphi_j$  correspond au flux magnétique associé à la source  $S_j$  ;
- $\theta_i$  correspond au potentiel magnétique au point  $M_i$ .

5 Dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore, ces coefficients sont donnés par :

$$C_{l,j} = -\frac{i\omega\rho}{2\pi} \frac{\exp(i\vec{k}\cdot\vec{M}_i\vec{S}_j)}{M_i S_j} \cdot dS_j$$

$$v_j = \vec{v}_j \quad [5]$$

$$V(M_i) = p_i$$

10 dans laquelle :

- $i^2 = -1$ .
- $\omega$  est la pulsation de l'onde sonore ;
- $\rho$  est la densité du milieu dans lequel se situe le point  $M_i$  ;
- 15 - le vecteur  $\vec{v}_j$  correspond à la vitesse sonore issue de la source  $S_j$  ;
- $\vec{k}$  correspond au vecteur d'onde de l'onde sonore ; et
- $p_i$  correspond à la pression acoustique générée par la propagation de l'onde ultrasonore au point  $M_i$ .

20

Dans l'expression des coefficients  $c_{l,j}$ , le terme  $dS_j$  correspond à la surface de l'échantillon associé à la source  $S_j$ . De préférence, le maillage d'une surface au sens de l'étape a) du procédé selon l'invention, est

choisi de sorte que chaque maille comporte une même surface  $dS=dS_1=dS_2=\dots=dS_j$ .

On remarque en particulier dans l'expression des  
 5 coefficients  $c_{1,j}$  qu'ils dépendent du produit scalaire  
 entre le vecteur d'onde et le vecteur  $\overline{M_1S_j}$ . Ainsi, pour  
 des ondes ultrasonores, on tient compte d'un déphasage  
 entre les chemins qui lient chaque source  $S_j$  à un point de  
 l'espace tridimensionnel  $M$ , ce déphasage étant dû à une  
 10 différence de marche entre les rayons partant de chaque  
 source et arrivant au point  $M$  (comme le montre la figure  
 4A). En particulier, on comprendra que l'angle d'incidence  
 d'un tel rayon est pris en compte dans l'expression des  
 coefficients de la matrice d'interaction  $F$ .

15

Bien entendu, dans le cadre de la propagation d'une onde  
 électromagnétique de fréquence élevée, donc de longueur  
 d'onde courte, qui diffère du cadre électrostatique ou  
 magnétostatique ci-avant, on tient compte du terme de  
 20 propagation  $\exp(i\vec{k}\cdot\vec{r})$  dans l'expression de la matrice  
 d'interaction, par rapport à la géométrie du problème à  
 résoudre, comme dans le cadre de la propagation d'une onde  
 ultrasonore ci-avant (relation [5]).

25 Ainsi, le système matriciel de l'équation [1] permet  
 d'estimer, à partir d'une matrice d'interaction  $F$  et d'un  
 vecteur comportant les valeurs  $v_j$  associées aux sources  
 $S_j$ , les coefficients d'un vecteur (matrice colonne)  
 comportant les valeurs de grandeur physique  $V(M_i)$  aux  
 30 points de l'espace  $M_i$ .

Pour déterminer les valeurs des sources  $v_j$ , on applique le système matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} V(P_1) \\ V(P_2) \\ \vdots \\ V(P_N) \end{pmatrix} = F \times \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} \quad [6]$$

où :

- les coefficients de la matrice d'interaction  $F$  s'expriment par avec  $C_{ij}=f(RS_j)$
- les indices  $i$  et  $j$  correspondent respectivement à la  $i^{\text{ème}}$  ligne et la  $j^{\text{ème}}$  colonne de la matrice d'interaction  $F$ . Cette matrice d'interaction comporte, pour la détermination des valeurs associées aux sources  $v_j$ ,  $N$  lignes et  $N$  colonnes, en rappelant que  $N$  est le nombre total de mailles à la surface de l'obstacle ;
- les points  $P_i$  correspondent au sommet des hémisphères  $HEM_i$  de la figure 1B.

La mise en œuvre de l'étape c) du procédé au sens de la présente invention correspond à calculer une condition aux limites pour les points  $P_i$ , de propriétés connues, comme on le verra plus loin.

Le système matriciel de l'équation [6] devient alors :

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} = F^{-1} \times \begin{pmatrix} V(P_1) \\ V(P_2) \\ \vdots \\ V(P_N) \end{pmatrix} \quad [7]$$

où :

- $F^{-1}$  correspond à l'inverse de la matrice d'interaction  $F$  ; et
- les valeurs  $V(P_i)$  sont prédéterminées, en fonction des conditions aux limites précitées.

On détermine ainsi les valeurs de source  $v_j$ .

10

A partir de l'estimation de ces valeurs de source  $v_j$ , on peut calculer la grandeur physique scalaire en un point  $M$  quelconque de l'espace tridimensionnel, à partir de la relation :

15

$$V(M) = \sum_{j=1}^N f(MS_j) v_j \quad [8]$$

Pour obtenir cette expression de la grandeur scalaire  $V(M)$ , la matrice d'interaction  $F$  peut ne comporter qu'une ligne de coefficients  $c_j$ , avec :

20

$$C_j = f(MS_j) ,$$

mais comporte toujours  $N$  colonnes.

En se référant à nouveau à la figure 1A, on comprendra que la surface de l'obstacle OBS recevant l'onde qu'émet l'élément rayonnant ER agit, elle-même, comme une surface active ré-émettant une onde secondaire (par exemple par

25

réflexion). Chaque source  $S_i$  représente une contribution à l'émission de cette onde secondaire.

En outre, pour tenir compte à la fois de la présence de l'onde principale et de la présence de l'onde secondaire au point M, on estime la contribution de l'onde principale et la contribution de l'onde secondaire au point M par le système matriciel :

$$V(M) = Fx \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{pmatrix} + F'x \begin{pmatrix} v'_1 \\ v'_2 \\ \vdots \\ v'_{N'} \end{pmatrix} \quad [9]$$

où :

- $F'$  est la matrice d'interaction entre la surface de l'élément rayonnant et le point M ;
- $v'_j$  (avec  $j=1,2,3,\dots,N'$ ) est la valeur des sources attribuées à chaque échantillon de surface  $dS'_j$  de l'élément rayonnant,  $N'$  étant le nombre total de mailles choisi pour la surface active de l'élément rayonnant ER.

Les coefficients de la matrice  $F'$  sont encore fonction de la distance  $MS'_j$ , où  $S'_j$  sont les sources affectées à chaque échantillon de surface  $dS'_j$  de l'élément rayonnant.

Selon une caractéristique avantageuse, les valeurs des sources de l'obstacle  $v_j$  sont déterminées en fonction des valeurs des sources de l'élément rayonnant  $v'_j$ , lesquelles

sont elles-mêmes calculées comme on le verra plus loin en référence aux figures 4A, 4B, 5A et 5B.

On se réfère maintenant à la figure 2A, dans laquelle on affecte trois sources à chaque échantillon de surface  $dS_i$ , en vue d'estimer une grandeur physique vectorielle  $\overline{V(M)}$ , en un point M de l'espace tridimensionnel.

En effet, on comprendra que pour estimer la grandeur vectorielle, par ses trois coordonnées dans l'espace x, y et z, le nombre d'équations à résoudre par rapport au système matriciel précédent doit être multiplié par trois. Ainsi, la matrice  $F^{-1}$  de la relation [7] doit comporter trois fois plus de lignes que précédemment. La matrice d'interaction F doit, elle-même, comporter trois fois plus de colonnes que précédemment et, à cet effet, on prévoit avantageusement trois sources par maille lorsqu'il s'agit de déterminer les coordonnées dans l'espace tridimensionnel d'un vecteur  $\overline{V(M)}$ .

20

En se référant à la figure 2B, les trois sources  $SA_i$ ,  $SB_i$ ,  $SC_i$ , attribuées à un échantillon de surface  $dS_i$  sont de positions respectives déterminées comme on l'indique ci-après. Telles que représentées sur la figure 2B, les trois sources  $SA_i$ ,  $SB_i$ ,  $SC_i$  sont coplanaires et le plan comportant ces trois sources comporte en outre la base de l'hémisphère  $HEM_i$ . L'hémisphère  $HEM_i$  est construit comme indiqué ci-avant (de même surface que la surface de la maille), avec toutefois le centre de l'hémisphère qui

25

correspond ici au barycentre des trois sources  $SA_i$ ,  $SB_i$  et  $SC_i$ .

5 On entend par "centre de l'hémisphère" le centre du disque qui constitue la base de l'hémisphère.

Les trois sources qui sont attribuées à l'échantillon de surface  $dS_i$  sont disposées aux sommets d'un triangle équilatéral dont le barycentre  $G_i$  correspond au centre de  
10 l'hémisphère. De préférence, chaque source  $SA_i$ ,  $SB_i$  et  $SC_i$  est disposée sur le milieu d'un rayon  $R_i$  de l'hémisphère. Ainsi, les droites qui relient le barycentre  $G_i$  à chaque source sont écartées angulairement de  $120^\circ$ .

15 En se référant à la figure 2C, l'orientation angulaire des triangles que forment les triplets de sources est choisie aléatoirement, d'un échantillon de surface à l'autre. Avantageusement, on évite ainsi des artefacts de sur-périodicité, dans l'estimation de la grandeur vectorielle  
20 au point M, qui pourraient résulter du choix d'une même orientation angulaire de ces triangles.

En référence avec les différents types d'ondes indiqués précédemment, la grandeur vectorielle  $\vec{V}(M)$  à estimer peut  
25 être :

- un champ électrique, dans le cadre de la propagation d'une onde électrique ;
- un champ magnétique, dans le cadre de la propagation d'une onde magnétique ; et
- 30 - une vitesse du son au point M, dans le cadre de la propagation d'ondes ultrasonores.

Pour déterminer les valeurs associées à chaque source  $SA_i$ ,  $SB_i$ ,  $SC_i$ , on met en forme le système matriciel selon la relation suivante :

5

$$\begin{pmatrix} V_x(P_1) \\ V_x(P_2) \\ \vdots \\ V_x(P_N) \\ V_y(P_1) \\ V_y(P_2) \\ \vdots \\ V_y(P_N) \\ V_z(P_1) \\ V_z(P_2) \\ \vdots \\ V_z(P_N) \end{pmatrix} = F_{\bar{V}} \times \begin{pmatrix} vA_1 \\ vA_2 \\ \vdots \\ vA_N \\ vB_1 \\ vB_2 \\ \vdots \\ vB_N \\ vC_1 \\ vC_2 \\ \vdots \\ vC_N \end{pmatrix} \quad [11]$$

On remarque, en particulier, que la matrice d'interaction  $F_{\bar{V}}$  est de dimensions  $3N \times 3N$ , où  $N$  est le nombre total d'échantillons de surface. La matrice d'interaction s'exprime ici par la relation :

10

$$F_{\bar{V}} = \begin{pmatrix} \overbrace{N\{C_A^x(i,j)\}}^N & \overbrace{C_B^x(i,j)}^N & \overbrace{C_C^x(i,j)}^N \\ N\{C_A^y(i,j)\} & C_B^y(i,j) & C_C^y(i,j) \\ N\{C_A^z(i,j)\} & C_B^z(i,j) & C_C^z(i,j) \end{pmatrix} \quad [12]$$



Les coefficients de cette matrice s'expriment par :

$$C_{\sigma}^u(i, j) = f_u[d(P_i, S\sigma_j)] \quad [13]$$

5 avec  $\sigma = A, B, C$   
 $i = 1, 2, \dots, N$   
 $j = 1, 2, \dots, N$   
 $u = x, y, z.$

10 et sont encore fonction d'une distance séparant le point de contact  $P_i$  de l'une des sources  $S\sigma_j$  ( $\sigma = A, B$  ou  $C$ ) d'un triplet associé à un échantillon de surface  $dS_j$ .

Par inversion de la matrice d'interaction  $F_{\bar{V}}$ , on  
 15 détermine ainsi les valeurs  $v\sigma_j$  associées à chaque source  $S\sigma_j$ , en appliquant des conditions aux limites sur les valeurs du vecteur  $\bar{V}$  aux points  $P_i$ . Ces conditions aux limites imposent une valeur du vecteur  $\bar{V}$ , selon ses trois coordonnées  $V_x(P_i)$ ,  $V_y(P_i)$  et  $V_z(P_i)$ .

20

Une fois que ces valeurs de sources  $v\sigma_j$  sont ainsi déterminées, on calcule facilement l'expression du vecteur  $\bar{V}$  en un point quelconque  $M$  de l'espace, par la relation :

$$\bar{V}(M) = V_x(M) \bar{x} + V_y(M) \bar{y} + V_z(M) \bar{z} \quad [14]$$

25

$$V_x(M) = \sum_{\substack{j=1, \dots, N \\ \sigma=A, B, C}} f_x[d(M, S\sigma_j)] \cdot v\sigma_j$$

$$V_y(M) = \sum_{\substack{j=1,\dots,N \\ \sigma=A,B,C}} f_y[d(M, S\sigma_j)] \cdot v\sigma_j$$

$$V_z(M) = \sum_{\substack{j=1,\dots,N \\ \sigma=A,B,C}} f_z[d(M, S\sigma_j)] \cdot v\sigma_j$$

5  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  et  $\bar{z}$  correspondent à des vecteurs unitaires portés par les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  de l'espace tridimensionnel.

Ainsi, la matrice d'interaction  $F_{\bar{y}}$ , lorsqu'elle est appliquée à un point quelconque  $M$  de l'espace, ne comporte  
10 finalement que trois lignes associées chacune à une coordonnée de l'espace  $x$ ,  $y$  ou  $z$ .

Pour différents types d'ondes, les valeurs des sources  $v\sigma_j$  sont, comme précédemment, une charge électrique pour une  
15 onde électrique, un flux magnétique pour une onde magnétique, une vitesse du son pour une onde ultrasonore.

Plus précisément, les coefficients de la matrice d'interaction  $F_{\bar{y}}$  se déterminent à partir des relations  
20 [3], [4] et [5] précédentes en précisant toutefois que :

$$\bar{V}(M) = -\overline{\text{grad}}[V(M)] \quad [15]$$

$V(M)$  étant la grandeur scalaire calculée précédemment par  
25 l'équation [8].

Ainsi, pour l'estimation d'une grandeur vectorielle  $\vec{V}$  au point M et pour les types d'onde cités ci-avant à titre d'exemple (électrique, magnétique et ultrasonore), les coefficients de la matrice d'interaction  $F_{\vec{V}}$  sont  
5 inversement proportionnels au carré d'une distance séparant chaque source du point M, alors que pour l'estimation d'une grandeur scalaire V en un point M de l'espace, les coefficients de la matrice d'interaction F sont simplement inversement proportionnels à cette  
10 distance. Chaque distance implique l'une des sources d'un triplet d'un échantillon de surface et un point M de l'espace. La matrice d'interaction  $F_{\vec{V}}$  comporte alors 3N colonnes lorsqu'il s'agit de prendre trois sources par échantillon de surface, alors que la matrice d'interaction  
15 F pour l'estimation de la grandeur scalaire ne comportait que N colonnes puisque seule une source par échantillon de surface était nécessaire.

Plus généralement, on attribue une source par échantillon  
20 lorsque l'on connaît des conditions aux limites pour une grandeur scalaire et trois sources par échantillon lorsque l'on connaît plutôt des conditions aux limites pour une grandeur vectorielle.

25 On se réfère maintenant à la figure 3A pour décrire, à titre illustratif, une application du procédé selon l'invention à l'estimation d'un potentiel électrique en un point M de l'espace tridimensionnel, situé entre deux armatures d'un condensateur. Les armatures de ce  
30 condensateur sont portées à des potentiels respectifs V1

et V2. La mise en œuvre de l'étape a) consiste d'abord à mailler les surfaces respectives des deux armatures. Dans l'exemple représenté sur la figure 3A, on n'a représenté que deux mailles pour chaque armature, simplement à titre illustratif.

L'application de l'étape b) consiste à mettre en forme le système matriciel impliquant la matrice d'interaction F et le vecteur colonne comportant les valeurs des sources S<sub>1</sub> à S<sub>4</sub>. La multiplication de ces deux matrices permet d'obtenir un vecteur colonne comportant les valeurs du potentiel en un ou plusieurs points M de l'espace.

La mise en œuvre de l'étape c) du procédé selon l'invention consiste à appliquer le système matriciel aux points de contact des hémisphères P<sub>1</sub> à P<sub>4</sub>, de chaque échantillon de surface dS<sub>1</sub> à dS<sub>4</sub>. Il en résulte la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} V(P_1) \\ V(P_2) \\ V(P_3) \\ V(P_4) \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{pmatrix} \frac{1}{P_1S_1} & \frac{1}{P_1S_2} & \frac{1}{P_1S_3} & \frac{1}{P_1S_4} \\ \frac{1}{P_2S_1} & \frac{1}{P_2S_2} & \frac{1}{P_2S_3} & \frac{1}{P_2S_4} \\ \frac{1}{P_3S_1} & \frac{1}{P_3S_2} & \frac{1}{P_3S_3} & \frac{1}{P_3S_4} \\ \frac{1}{P_4S_1} & \frac{1}{P_4S_2} & \frac{1}{P_4S_3} & \frac{1}{P_4S_4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} \quad [16]$$

avec

$$\begin{aligned} V(P_1) &= V(P_2) = V_1 \\ V(P_3) &= V(P_4) = V_2 \\ V_1 &= q_1, \quad V_2 = q_2, \quad v_3 = q_3, \quad v_4 = q_4 \end{aligned}$$

Ici, la condition aux limites impose que la valeur du potentiel aux points de contact  $P_1$  et  $P_2$  correspond au potentiel  $V_1$  de la première armature. De même, le potentiel électrique aux points de contact  $P_3$  et  $P_4$  correspond au potentiel électrique de la seconde armature  $V_2$ . Par inversion de la matrice d'interaction appliquée au point de contact  $P_i$ , on détermine les valeurs des sources  $v_i$  qui correspondent, comme exprimé dans la relation [16], à des charges électriques  $q_i$ .

10

Les coefficients de la matrice d'interaction  $\frac{1}{2\pi\epsilon_0 P_i S_j}$  sont parfaitement connus, puisque les positions des sources  $S_j$  et les positions des points de contact  $P_i$  sont déterminées au préalable, comme représenté sur la figure 1B.

15

L'expression du potentiel électrique  $V(M)$  au point  $M$  entre les deux armatures est finalement donnée par l'expression :

20

$$V(M) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{MS_1} + \frac{q_2}{MS_2} + \frac{q_3}{MS_3} + \frac{q_4}{MS_4} \right) \quad [17]$$

25

On se réfère maintenant à la figure 3B sur laquelle on a représenté les mêmes armatures que sur la figure 3A, avec sensiblement un même maillage, mais dans le but, ici, d'estimer une grandeur vectorielle correspondant au champ électrique  $\overline{E(M)}$ , au point  $M$  de l'espace tridimensionnel.

On peut appliquer les relations [11] à [15] pour estimer la valeur du champ électrique au point M, avec, dans la relation [13] :

$$5 \quad C_{\sigma}^u(i,j) = \left( \frac{1}{2\pi\epsilon_0 d^2(P_i, S\sigma_j)} \right)_u \quad [18]$$

avec

$$\sigma = A, B, C$$

$$u = x, y, z$$

$$i = 1, 2, 3, 4$$

$$10 \quad j = 1, 2, 3, 4.$$

Toutefois, les valeurs du champ électrique au point de contact  $P_i$  restent à déterminer dans la relation [11].

15 On introduit alors une loi générale prédéterminée du comportement du champ (en réflexion, en transmission, ou autre) au niveau de la surface de l'obstacle (des armatures dans l'exemple du condensateur précité), pour connaître les valeurs des sources  $V\sigma_j$ .

20

Par exemple, si l'onde électrique est totalement réfléchie par la surface d'un obstacle (par exemple l'une des deux armatures), le champ électrique en un point de contact  $P_i$  est normal à la surface  $dS_i$  et ses composantes  $E_x$  et  $E_y$  sont nulles. A titre illustratif, si la surface de l'armature n'était représentée que par un seul échantillon de surface à trois sources, les valeurs de ses sources  $vA$ ,  $vB$  et  $vC$  seraient toutes égales entre elles à une même valeur  $+q$ .

25

Au contraire, si le coefficient de réflexion est pratiquement nul à la surface  $dS_1$ , la composante du champ électrique  $E_z$  au point  $P_i$  est nulle, ce qui correspond  
5 bien au cas où le champ est sensiblement tangent à la surface  $dS_1$ . Ainsi, à titre illustratif, si la surface de l'armature n'était représentée que par un seul échantillon de surface à trois sources, les valeurs de ses sources  $vA$ ,  $vB$  et  $vC$  seraient respectivement, par exemple,  $+q$ ,  $+q$  et  
10  $-2q$ . Par exemple, dans le cadre de la propagation d'une onde magnétique, si la surface d'un capteur à courants de Foucault (avec une composante normale du champ magnétique nulle) était représentée par un unique échantillon de surface, les flux magnétiques des trois sources associées  
15 à cet échantillon de surface seraient  $+\phi$ ,  $+\phi$  et  $-2\phi$ .

On comprend ainsi qu'avec les trois sources par échantillon  $dS_1$ , on peut définir, par exemple en fonction de la pondération de chaque source, une orientation  
20 quelconque du champ à la surface de l'obstacle.

Bien entendu, cette démarche suppose que le coefficient de réflexion  $R$  d'un obstacle soit connu auparavant. En particulier, il peut être avantageux de comparer une  
25 simulation et une mesure expérimentale pour détecter, à la surface d'un obstacle, des inhomogénéités ou des impuretés qui correspondent à des points de la surface de cet obstacle qui ne vérifient pas les valeurs du coefficient de réflexion  $R$  imposées à chaque point prédéterminé  $P_i$  de  
30 l'obstacle.

On peut affecter ainsi une valeur prédéterminée du coefficient de réflexion à chaque point  $P_i$  de la surface de l'obstacle. A cet effet, on introduit une matrice  $R$  qui est représentative du coefficient de réflexion en chaque point  $P_i$ . Pour une interaction entre un élément rayonnant et un obstacle, on peut ainsi exprimer le système matriciel de la relation [9] autrement, c'est-à-dire en donnant une expression unique de toutes les sources du système (à la fois de l'obstacle et de l'élément rayonnant), comme indiqué ci-après.

Dans ce qui suit, on indique que :

- $F(P)$  est la matrice d'interaction de l'obstacle OBS appliquée aux points  $P_i$  de la surface de l'obstacle OBS ;
- $F(P')$  est la matrice d'interaction de l'obstacle OBS appliquée aux points  $P'_i$  de la surface de l'élément rayonnant ER ;
- $F'(P)$  correspond à la matrice d'interaction de l'élément rayonnant ER appliquée aux points  $P_i$  de la surface de l'obstacle OBS ;
- $F'(P')$  correspond à la matrice d'interaction de l'élément rayonnant ER appliquée aux points  $P_i$  de la surface de l'élément rayonnant ER ;
- $\bar{V}'$  correspond au vecteur colonne comportant les valeurs des sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant ER ; et
- $\bar{V}$  correspond au vecteur colonne comportant les valeurs des sources  $S_i$  de l'obstacle OBS.

Sur l'obstacle, la contribution de l'onde émise par l'élément rayonnant ER s'exprime par :



$$\bar{V}'(P) = F'(P) \cdot \bar{v}' \quad [19]$$

La contribution de l'onde secondaire renvoyée par  
 5 l'obstacle OBS s'exprime, par définition, par la  
 relation :

$$\bar{V}(P) = F(P) \cdot \bar{v} \quad [20]$$

10 Or, dans l'exemple représenté sur la figure 4A, l'onde  
 secondaire correspond simplement à une réflexion de l'onde  
 principale. Ce qui s'exprime par la relation :

$$\bar{V}(P) = R \bar{V}'(P) \quad [21]$$

15

où R correspond à une matrice de réflexion dont chaque  
 coefficient représente la contribution à l'émission, par  
 réflexion, de l'onde secondaire, par chaque source  $S_i$  (ou  
 $S\sigma_i$ , dans le cadre d'une estimation d'une grandeur  
 20 vectorielle) de l'obstacle OBS.

Des trois relations [19], [20] et [21], on déduit  
 l'expression du vecteur colonne  $\bar{v}$  comportant les valeurs  
 des sources de l'obstacle, à partir du vecteur colonne  $\bar{v}'$   
 25 comportant les valeurs des sources de l'élément rayonnant,  
 par la relation :

$$\bar{v} = [F(P)]^{-1} \cdot R \cdot [F'(P)] \cdot \bar{v}' \quad [22]$$

Par ailleurs, pour une estimation fine des grandeurs scalaires ou vectorielles au point M, notamment pour tenir compte de réflexions multiples, il est avantageux de tenir compte de la contribution du rayonnement par l'obstacle, au niveau de la surface de l'élément rayonnant ER. A cet effet, on tient compte, dans l'estimation des conditions aux limites à la surface de l'élément rayonnant ER (aux points  $P'_i$ ) de la contribution du rayonnement des sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant et de la contribution de l'émission de l'onde secondaire par les sources  $S_i$  de l'obstacle, par la relation :

$$\vec{V}_T(P') = F(P') \vec{v} + F'(P') \vec{v}' \quad [23]$$

On peut ainsi ajuster, grâce à la relation [23], les valeurs de sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant ER, en tenant compte de la réflexion de l'obstacle OBS, selon la relation suivante :

$$\vec{V}_T(P') = \left\{ F(P') \cdot [F(P)]^{-1} \cdot R \cdot [F'(P)] + F'(P') \right\} \cdot \vec{v}' \quad [10]$$

Ainsi, on impose simplement des conditions aux limites pour l'élément rayonnant, pour en déduire les valeurs des sources  $v'_i$ . En pratique, on procédera préférentiellement comme suit :

- après maillage des surfaces, on détermine la position des points  $P_i$  et  $P'_i$  et des sources  $S_i$  et  $S'_i$ ;
- en fonction du type d'onde en jeu, on détermine les coefficients des matrices  $F(P)$ ,  $F'(P)$ ,  $F(P')$  et  $F'(P')$ ;

- en fonction d'une loi de réflexion de l'obstacle, on détermine les coefficients de la matrice de réflexion comme dans l'exemple donné plus loin pour une onde ultrasonore;
- 5 - en fonction de conditions aux limites sur l'élément rayonnant (dont le comportement est généralement connu pour un problème donné), on détermine les valeurs du vecteur  $\vec{V}_r(P)$  aux points  $P'_i$  de la surface de l'élément rayonnant et on en déduit les valeurs des sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant par inversion de la relation [10];
- 10 - on en déduit aussi les valeurs des sources  $S_i$  de l'obstacle par application de la relation [22];
- une fois les valeurs de toutes les sources  $S_i$  et  $S'_i$  déterminées, on peut appliquer le système matriciel donné par la relation [9] à tout point M de l'espace, en appliquant à ce point M les matrices d'interaction F et F' (impliquant la position du point M et les positions des sources respectives  $S_i$  et  $S'_i$ ).
- 15
- 20 En se référant à nouveau à la figure 4A, on considère que l'obstacle OBS représente simplement une interface entre deux milieux M1 et M2, formant ainsi un dioptre qui peut être plan, tel que représenté dans l'exemple de la figure 4A, mais aussi incurvé ou de forme générale quelconque.
- 25 Les coefficients de réflexion  $R_i$  associés à chaque point  $P_i$  dépendent, dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore ou électromagnétique de haute fréquence, de l'angle d'incidence  $\beta_i$  du rayon issu de la source  $S_i$ , au point de l'espace tridimensionnel M.

Pour une onde ultrasonore, l'expression des coefficients de réflexion  $R_i$  est donnée par :

$$R_i = \frac{\rho_2 c_2 \cos \beta_i - \rho_1 c_1 \left[ 1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} + \frac{c_2^2}{c_1^2} \cos^2 \beta_i \right]^{1/2}}{\rho_2 c_2 \cos \beta_i + \rho_1 c_1 \left[ 1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} + \frac{c_2^2}{c_1^2} \cos^2 \beta_i \right]^{1/2}} \quad [24]$$

5

où :

- $c_1$  est la vitesse du son dans le milieu  $M_1$  ;
- $c_2$  est la vitesse du son dans le milieu  $M_2$  ;
- $\rho_1$  est la densité du milieu  $M_1$  ;
- 10 -  $\rho_2$  est la densité du milieu  $M_2$ .

Dans cette expression [24], le terme  $\cos \beta_i$  peut simplement être estimé en fonction des coordonnées dans l'espace du point M et du point représentant la source  $S_i$ .

- 15 En se référant maintenant à la figure 4B, la même estimation peut être menée pour un point M situé dans le milieu  $M_2$ . Dans ce cas, l'onde que reçoit le point M est une onde transmise par l'obstacle OBS. En particulier, on remarque que les sources de l'élément rayonnant ER ne sont
- 20 plus actives, du fait de l'occultation de l'élément rayonnant ER par l'obstacle OBS. En transmission, le raisonnement s'applique comme précédemment avec une condition aux limites imposée aux points  $P_i$  par les valeurs des coefficients de transmission  $T_i$  associés à
- 25 chaque point  $P_i$ . Dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore, chaque coefficient de transmission  $T_i$  est donné par la relation :

$$T_i = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \beta_i}{\rho_2 c_2 \cos \beta_i + \rho_1 c_1 \left[ 1 - \frac{c_2^2}{c_1^2} + \frac{c_2^2}{c_1^2} \cos^2 \beta_i \right]^{1/2}} \quad [25]$$

Comme indiqué précédemment, les termes  $\cos \beta_i$  peuvent être  
 5 déterminés en fonction des coordonnées respectives des  
 sources  $S_i$  et du point M.

Pour estimer les valeurs de sources  $S_i$  de l'obstacle OBS,  
 on applique la relation [22] en remplaçant toutefois la  
 10 matrice de réflexion R par la matrice de transmission T :

$$\bar{v} = [F(P)]^{-1} T[F'(P)] \bar{v} \quad [26]$$

Dans le cadre de la propagation d'une onde ultrasonore,  
 15 les coefficients des matrices R et T s'estiment pour  
 chaque source  $S_i$  et pour chaque point  $P_i$ . En particulier,  
 chaque coefficient  $T_{i,j}$  ou  $R_{i,j}$  de la matrice T ou de la  
 matrice R (où i correspond à la  $i^{\text{ème}}$  ligne et j correspond  
 à la  $j^{\text{ème}}$  colonne) s'exprime en fonction d'un angle  $\beta_{ij}$   
 20 entre une normale à la surface de l'obstacle au point  $P_i$   
 et une droite passant par le point  $P_i$  et par une source  
 $S_j$ . On peut écrire ainsi, de manière générale, les deux  
 relations exprimant les valeurs des coefficients des  
 matrices T et R par les relations respectives suivantes :

25

$$T_{i,j} = f_t(\cos \beta_{ij}) \quad [27]$$

$$R_{i,j} = f_r (\cos \beta_{ij}) \quad [28]$$

où  $f_t$  est donné par la relation [25] et  $f_r$  est donné par la relation [24].

5

De façon plus générale, en référence aux figures 4A et 4B, on indique que, si l'on considère l'obstacle comme un matériau plein représentant un milieu M2 distinct d'un milieu M1 dans lequel se propageait initialement l'onde principale :

10

- pour une réflexion de l'onde principale sur l'obstacle en tant que milieu M2 (la surface de l'obstacle formant dioptré entre les milieux M1 et M2), les hémisphères  $HEM_i$  sont orientés vers l'extérieur de l'obstacle (figure 4A) ;
- 15 - pour une transmission de l'onde principale dans l'obstacle, les hémisphères  $HEM_i$  sont orientés vers l'intérieur de l'obstacle (figure 4B).

20

On se réfère maintenant à la figure 5A pour décrire le cas d'un l'obstacle plan OBS de dimensions finies, excité par un élément rayonnant ER, incliné d'un angle prédéterminé par rapport à l'obstacle OBS. Comme indiqué précédemment, pour une onde ultrasonore, on prendra en compte l'inclinaison de l'élément rayonnant pour calculer la contribution de l'onde émise par l'élément rayonnant au point M. Par ailleurs, de façon particulièrement avantageuse, on maille une surface qui englobe la surface de l'obstacle (figure 5A). Pour une tranche de l'espace délimitée par l'élément rayonnant, d'une part, et 25 l'obstacle, d'autre part (figure 5A), on peut considérer trois types de sources :

30

- les sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant ER,
- des sources  $SO_i$ , qui renvoient l'onde secondaire, par réflexion de l'obstacle OBS, en fonction d'un certain coefficient de réflexion R de l'obstacle ; et
- 5 - des sources  $SS_i$ , qui ne renvoient pas d'onde secondaire et auxquelles un coefficient de réflexion nul peut être attribué si l'obstacle sépare deux milieux d'indices identiques. Dans ce cas, ces sources  $SS_i$  sont considérées comme "éteintes" dans la tranche de
- 10 l'espace précitée et ne sont pas prises en compte dans les calculs de la grandeur physique au point M de la figure 5A. En revanche, ces sources  $SS_i$  peuvent être actives par réflexion de l'onde principale si l'obstacle OBS sépare deux milieux d'indices
- 15 différents.

Par ailleurs, pour estimer les grandeurs scalaires ou vectorielles associées à un point M d'un demi-espace délimité par la surface englobant l'obstacle OBS (à droite

20 de la figure 5B), on considère :

- les sources  $SO'_i$  de l'obstacle, actives par transmission de l'onde principale, et
- les sources  $SS_i$ , auxquelles on affecte maintenant un coefficient de transmission égal à 1 si l'obstacle
- 25 sépare deux milieux de mêmes indices. Ces sources  $SS_i$  se comportent finalement (aux angles d'incidence près) comme les sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant ER.

Les sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant peuvent alors être "éteintes" pour le calcul des grandeurs physiques dans ce

30 demi-espace.

Pour calculer les valeurs  $\bar{v}$  des sources  $S'_i$  de l'élément rayonnant (desquelles sont déduites les valeurs  $\bar{v}$  des sources de l'obstacle selon les relations [22] et [26]), on appliquera simplement des conditions aux limites aux points de la surface active de l'élément rayonnant ER. Par exemple, pour une propagation d'onde ultrasonore, on peut indiquer que les vitesses sonores aux points de la surface de l'élément rayonnant ER sont perpendiculaires à cette surface et de modules  $v_0$  égaux entre eux.

10

De manière générale, on indique que l'espace tridimensionnel peut être ainsi découpé par des interfaces délimitant des milieux de propriétés distinctes, chaque interface représentant un obstacle au sens de la présente invention. On calcule alors les grandeurs physiques dans chaque tranche de l'espace. Par exemple, dans le cadre de l'étude d'une hétérostructure (à plusieurs interfaces) on applique le procédé ci-avant pour des tranches successives de l'espace en considérant deux interfaces : l'une représentant un "élément rayonnant" au sens des figures 4A et 5A, par exemple par transmission d'une onde reçue, et l'autre représentant un obstacle recevant l'onde transmise. Avantageusement, on tient compte, pour chaque tranche de l'espace, des contributions de toutes les interfaces comme exprimé par les relations [10] et [22].

20

25

La simulation de la figure 5C correspond, pour une onde ultrasonore, à la situation des figures 5A et 5B en tenant compte :

30

- de la contribution de l'émission de l'onde principale par l'élément rayonnant ER ;



- de la contribution de la réflexion de cette onde principale par l'obstacle ; et
- de la contribution de la transmission de l'onde principale par l'obstacle.

5

Les lignes de niveau de la figure 5C correspondent à différents paliers de pression acoustique. L'élément rayonnant ER est disposé à 10 mm de l'obstacle OBS et incliné de  $20^\circ$  par rapport à ce dernier. On remarque en particulier des franges d'interférences dans une zone entre l'obstacle OBS et l'élément rayonnant ER. Une telle simulation peut avantageusement indiquer une position idéale d'un capteur ultrasonore. Ces capteurs ultrasonores comportent habituellement un transducteur comme élément rayonnant actif et un détecteur pour mesurer les ondes ultrasonores reçues. La simulation de la figure 5C peut ainsi indiquer en outre la forme idéale d'un capteur ultrasonore, selon les applications souhaitées, pour une forme d'obstacle donnée.

20

La simulation de la figure 5C a été effectuée grâce à un calcul matriciel programmé à l'aide du logiciel de calcul MATLAB®. Le nombre de mailles total choisi pour l'obstacle et pour l'élément rayonnant (ici, quelques centaines en tout) est alors optimisé :

25

- d'une part, pour limiter la durée des calculs ; et
- d'autre part, pour que la taille des mailles reste inférieure à une demie longueur d'onde, de manière à vérifier le critère de Rayleigh.

30

On indique toutefois que, comme les éléments à mailler dans la mise en œuvre du procédé selon l'invention sont simplement des surfaces, les temps de calcul sont bien moins longs que ceux nécessaires dans la mise en œuvre  
5 d'un procédé de calcul de type "par éléments finis".

La présente invention peut ainsi se manifester par la mise en œuvre d'une succession d'instructions d'un produit programme d'ordinateur stocké dans la mémoire d'un disque  
10 dur ou d'un support amovible et se déroulant comme suit :

- choix d'un pas de maillage notamment en fonction de la longueur d'onde de l'onde principale ;
- détermination des coordonnées des sources  $S_i$  et/ou  $S'_i$  et des points de contact  $P_i$  et/ou  $P'_i$  ;
- 15 - choix d'un type d'onde en jeu et calcul des coefficients des matrices d'interaction appliquées aux points  $P_i$  et/ou  $P'_i$  par la mise en œuvre d'un logiciel de calcul matriciel ;
- choix d'une loi de réflexion et/ou de transmission de  
20 la surface de l'obstacle et calcul des coefficients des matrices de réflexion et/ou de transmission ;
- calcul des valeurs des sources  $S_i$  et/ou  $S'_i$  ; et
- calcul des grandeurs scalaires ou vectorielles en tout point de l'espace tridimensionnel.

25

A ce titre, la présente invention vise aussi un tel produit programme d'ordinateur.

Bien entendu, la présente invention ne se limite pas à la  
30 forme de réalisation décrite ci-avant à titre d'exemple ; elle s'étend à d'autres variantes.

Ainsi, on comprendra que, même si dans les figures commentées ci-avant on représente à la fois la surface d'un obstacle et la surface d'un élément rayonnant, la présente invention s'applique aussi à l'estimation de grandeurs physiques dans le cadre d'une onde interagissant avec un obstacle et émise en champ lointain. Dans ce contexte, il n'est pas nécessaire de matérialiser la surface d'un élément rayonnant à mailler et les relations [8] et [14] ci-avant suffisent à déterminer l'interaction entre cette onde et l'obstacle.

On a indiqué ci-avant des équations permettant de calculer les grandeurs scalaires ou vectorielles en un point M de l'espace, pour des ondes électromagnétiques, ou encore acoustiques. Bien entendu, ces grandeurs peuvent être estimées pour d'autres types d'ondes, notamment pour des ondes thermiques, des ondes électromagnétiques impliquant des antennes radiofréquences, ou autres.

Bien entendu, la présente invention ne se limite pas à une application au contrôle non destructif, mais à tout type d'application, notamment en imagerie médicale, par exemple pour l'étude de microsystèmes mettant en œuvre une microscopie acoustique à miroirs mobiles.

On a décrit ci-avant des interactions entre une onde et un obstacle unique. Bien entendu, la présente invention s'applique à une interaction avec plusieurs obstacles. A cet effet, il convient simplement de mailler les surfaces de ces obstacles et d'additionner leur contribution pour

l'estimation d'une grandeur vectorielle ou scalaire en un point quelconque de l'espace. De même, comme indiqué ci-avant, la surface de l'obstacle OBS peut être plane, ou encore incurvée, ou encore de forme complexe quelconque.

5

Ainsi, dans le cadre d'une onde interagissant avec plusieurs obstacles dans l'espace, une simulation équivalente à celle représentée sur la figure 5C permettrait de positionner des capteurs et/ou des éléments rayonnants en fonction de la configuration de ces obstacles, notamment pour une application à la détermination de la position de hauts-parleurs dans un habitacle cloisonné, tel qu'un habitacle de véhicule automobile.

15

L'espace tridimensionnel peut être découpé en une pluralité de régions, comme décrit ci-avant en référence aux figures 4A, 4B, 5A et 5B. Toutefois, pour qu'une surface de l'une desdites régions soit considérée comme un obstacle d'une onde principale, devenant actif par émission d'une onde secondaire, l'incidence de l'onde principale sur cette surface doit préférentiellement rester inférieure ou égale à  $90^\circ$ .

20

### Revendications

1. Procédé pour évaluer une grandeur physique associée à une interaction entre une onde et un obstacle, dans une région de l'espace tridimensionnel, dans lequel :
- 5 a) on détermine, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface ( $ds_i$ ) dont une partie au moins représente la surface d'un obstacle recevant une onde principale et émettant, en réponse, une onde secondaire, et l'on attribue à chaque échantillon de surface au moins
- 10 une source ( $S_i$ ) émettant une onde élémentaire représentant une contribution à ladite onde secondaire,
- b) on forme un système matriciel comportant :
- une matrice d'interaction ( $F(M)$ ), inversible,

15 appliquée à une région donnée ( $M$ ) de l'espace et comportant un nombre de colonnes correspondant à un nombre total de sources,

  - une première matrice colonne dont chaque coefficient ( $v_i$ ) est associé à une source ( $S_i$ ) et caractérise

20 l'onde élémentaire qu'elle émet,

  - et une seconde matrice colonne, obtenue par une multiplication de la première matrice colonne par la matrice d'interaction et dont les coefficients sont des valeurs d'une grandeur physique ( $V(M)$ )

25 représentative de l'onde émise par l'ensemble des sources en ladite région donnée ( $M$ ),

c) pour estimer les coefficients de la première matrice colonne ( $v_i$ ), on affecte des valeurs de grandeur physique choisies ( $V(P_i)$ ) à des points prédéterminés ( $P_i$ ), associés

30 chacun à un échantillon de surface ( $ds_i$ ), lesdites valeurs choisies ( $V(P_i)$ ) étant rangées dans la seconde matrice

colonne, et l'on multiplie cette seconde matrice colonne par l'inverse de la matrice d'interaction appliquée auxdits points prédéterminés ( $P_i$ ),

d) pour évaluer ladite grandeur physique ( $V(M)$ )  
5 représentant l'onde émise par l'ensemble des sources dans une région donnée ( $M$ ) de l'espace tridimensionnel, on applique la matrice d'interaction à ladite région donnée ( $M$ ) et on multiplie cette matrice d'interaction par la première matrice colonne comportant les coefficients  
10 estimés à l'étape c).

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel, pour évaluer une grandeur physique représentative d'une interaction entre un élément rayonnant une onde principale  
15 et un obstacle recevant cette onde principale,

- à l'étape a), on détermine en outre, par maillage, une pluralité d'échantillons de surface ( $dS'_i$ ) représentant ensemble une surface active de l'élément rayonnant l'onde principale, et l'on attribue à chaque échantillon de la  
20 surface active au moins une source ( $S'_i$ ) émettant une onde élémentaire représentant une contribution à ladite onde principale,

- on applique en outre les étapes b), c) et d) aux échantillons de la surface active, et

25 - on évalue ladite grandeur physique ( $V(M)$ ) représentant l'interaction entre l'élément rayonnant et l'obstacle dans une région donnée ( $M$ ) de l'espace tridimensionnel, en prenant en compte la contribution, en ladite région donnée ( $M$ ), de l'onde principale émise par l'ensemble des sources  
30 de la surface active et la contribution de l'onde

secondaire émise par l'ensemble des sources de la surface de l'obstacle.

3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel chaque coefficient de la matrice d'interaction, appliquée à une région donnée de l'espace, est représentatif d'une interaction entre une source et ladite région donnée et la valeur de chaque coefficient est fonction d'une distance entre une source et ladite région donnée.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel la matrice d'interaction appliquée, à l'étape c), auxdits points prédéterminés ( $P_i$ ), comporte un nombre de lignes correspondant à un nombre total de points prédéterminés ( $P_i$ ).

5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la grandeur physique à évaluer est une grandeur scalaire ( $V(P_i)$ ) et, à l'étape a), on attribue une source unique à chaque échantillon de surface.

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel la matrice d'interaction ( $F(M)$ ) appliquée, à l'étape d), à une région de l'espace ( $M$ ), comporte une ligne.

7. Procédé selon l'une des revendications 5 et 6, dans lequel chaque point prédéterminé ( $P_i$ ) associé à un échantillon de surface ( $dS_i$ ) correspond à un point de contact entre cet échantillon de surface ( $dS_i$ ) et un hémisphère dont la surface est égale à la surface de cet

échantillon de surface, et de centre correspondant à une position de la source ( $S_i$ ) qui est attribuée à cet échantillon de surface.

5 8. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel :

- l'onde principale est une onde électrique,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de charge électrique associées chacune à une
- 10 source, et
- les coefficients de la seconde matrice colonne sont des valeurs de potentiel électrique.

15 9. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel :

- l'onde principale est une onde magnétique,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de flux magnétique associées chacune à une source,
- et
- 20 - les coefficients de la seconde matrice colonne sont des valeurs de potentiel magnétique.

10. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel:

- 25 - l'onde principale est une onde sonore,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de vitesse de son associées chacune à une source,
- et
- les coefficients de la seconde matrice colonne sont des
- 30 valeurs de pression acoustique.



11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel la grandeur physique à évaluer est une grandeur vectorielle ( $\underline{V}(P_i)$ ) exprimée par ses trois coordonnées dans l'espace tridimensionnel, et l'on attribue, à l'étape  
5 a), trois sources ( $SA_i, SB_i, SC_i$ ) à chaque échantillon de surface ( $dSi$ ).

12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel la matrice d'interaction ( $F_v(M)$ ) appliquée, à l'étape d), à  
10 une région de l'espace ( $M$ ), comporte une ligne pour chaque coordonnée ( $X, Y, Z$ ) de l'espace.

13. Procédé selon l'une des revendications 11 et 12, dans lequel :  
15 - les trois sources attribuées à chaque échantillon de surface sont sensiblement dans un même plan et  
- chaque point prédéterminé ( $P_i$ ) associé à un échantillon de surface ( $dSi$ ) correspond à un point de contact entre cet échantillon et un hémisphère dont la surface est égale  
20 à la surface de cet échantillon, et de centre correspondant à la position d'un barycentre des trois sources.

14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel les  
25 trois sources d'un même échantillon de surface forment sensiblement un triangle équilatéral, et les triangles des échantillons de surface sont orientés sensiblement aléatoirement les uns par rapport aux autres.

30 15. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, dans lequel :

- l'onde principale est une onde électrique,
  - les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de charge électrique associées chacune à une source, et
- 5    - les coefficients de la seconde matrice colonne sont des valeurs de coordonnées d'un champ électrique.

16. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, dans lequel :

- 10    - l'onde principale est une onde magnétique,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de flux magnétique associées chacune à une source, et
  - les coefficients de la seconde matrice colonne sont des
- 15    valeurs de coordonnées d'un champ magnétique.

17. Procédé selon l'une des revendications 11 à 14, dans lequel :

- 20    - l'onde principale est une onde sonore,
- les coefficients de la première matrice colonne sont des valeurs de vitesse de son associées chacune à une source, et
  - les coefficients de la seconde matrice colonne sont des
- 25    valeurs de coordonnées d'une vitesse acoustique.

- 25    18. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel, pour estimer la contribution de l'onde secondaire en ladite région donnée à l'étape d), lesdites valeurs de grandeur physique ( $V(P_i)$ ) choisies à l'étape c)
- 30    sont fonction d'un coefficient prédéterminé de réflexion

et/ou de transmission de l'onde principale par chaque échantillon de surface de l'obstacle.

19. Procédé selon la revendication 18, prise en  
5 combinaison avec l'une des revendications 6 et 12, dans lequel l'onde secondaire correspond à une réflexion de l'onde principale sur l'obstacle et l'hémisphère est orienté vers l'extérieur de l'obstacle.

10 20. Procédé selon la revendication 18, prise en combinaison avec l'une des revendications 6 et 12, dans lequel l'onde secondaire correspond à une transmission de l'onde principale dans l'obstacle et l'hémisphère est orienté vers l'intérieur de l'obstacle.

15

21. Procédé selon l'une des revendications 19 et 20, dans lequel, à l'étape c), on détermine les valeurs ( $v_i$ ) associées aux sources ( $S'_i$ ) de l'élément rayonnant (ER) et on met en forme au moins :

- 20 - une première matrice d'interaction ( $F(P)$ ) représentant la contribution des sources de l'obstacle aux points prédéterminés de la surface de l'obstacle ( $P_i$ ),  
- une seconde matrice d'interaction ( $F'(P)$ ) représentant la contribution des sources de l'élément rayonnant aux  
25 points prédéterminés de la surface de l'obstacle ( $P_i$ ),  
- une matrice de réflexion ( $R$ ) ou de transmission ( $T$ ), dont les coefficients représentent des coefficients de réflexion ou de transmission en chaque point prédéterminé ( $P_i$ ) de l'obstacle,  
30 pour déterminer les valeurs des sources de l'obstacle ( $v_i$ ) en fonction des valeurs des sources de l'élément rayonnant

( $v'_i$ ) et d'une multiplication des première et seconde matrices d'interaction et de la matrice de réflexion ou de transmission.

5 22. Procédé selon la revendication 21, dans lequel, à l'étape c), on détermine les valeurs ( $v'_i$ ) associées aux sources ( $S'_i$ ) de l'élément rayonnant (ER) en tenant compte de la réception de l'onde secondaire par l'élément rayonnant (ER) et en mettant en forme en outre :

10 - une troisième matrice d'interaction ( $F(P')$ ) représentant la contribution des sources de l'obstacle aux points prédéterminés de la surface de l'élément rayonnant ( $P'_i$ ),  
- et une quatrième matrice d'interaction ( $F'(P')$ ) représentant la contribution des sources de l'élément  
15 rayonnant aux points prédéterminés de la surface de l'élément rayonnant ( $P'_i$ ).

23. Procédé selon l'une des revendications 19 à 22, dans lequel la surface de l'obstacle correspond à une interface  
20 entre deux milieux distincts d'une hétérostructure.

24. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'onde principale est une onde sonore et les coefficients de la matrice d'interaction sont chacun  
25 fonction d'un angle d'incidence d'une onde élémentaire issue d'une source en ladite région donnée (M).

25. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'onde principale est une onde sonore et, à  
30 l'étape a), on choisit un nombre total d'échantillons de surface ( $dS_i$ ) sensiblement en fonction d'une longueur

d'onde de l'onde sonore pour vérifier le critère de Rayleigh.

5 26. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on compare une pluralité de valeurs de la grandeur physique estimée à l'étape d), obtenues pour une pluralité de régions de l'espace, pour sélectionner une région candidate pour la disposition d'un élément rayonnant destiné à interagir avec l'obstacle.

10

27. Procédé selon l'une des revendications 2 à 26, dans lequel l'élément rayonnant est un capteur, pour un contrôle non destructif, destiné à analyser un objet formant un obstacle de l'onde principale.

15

1/8

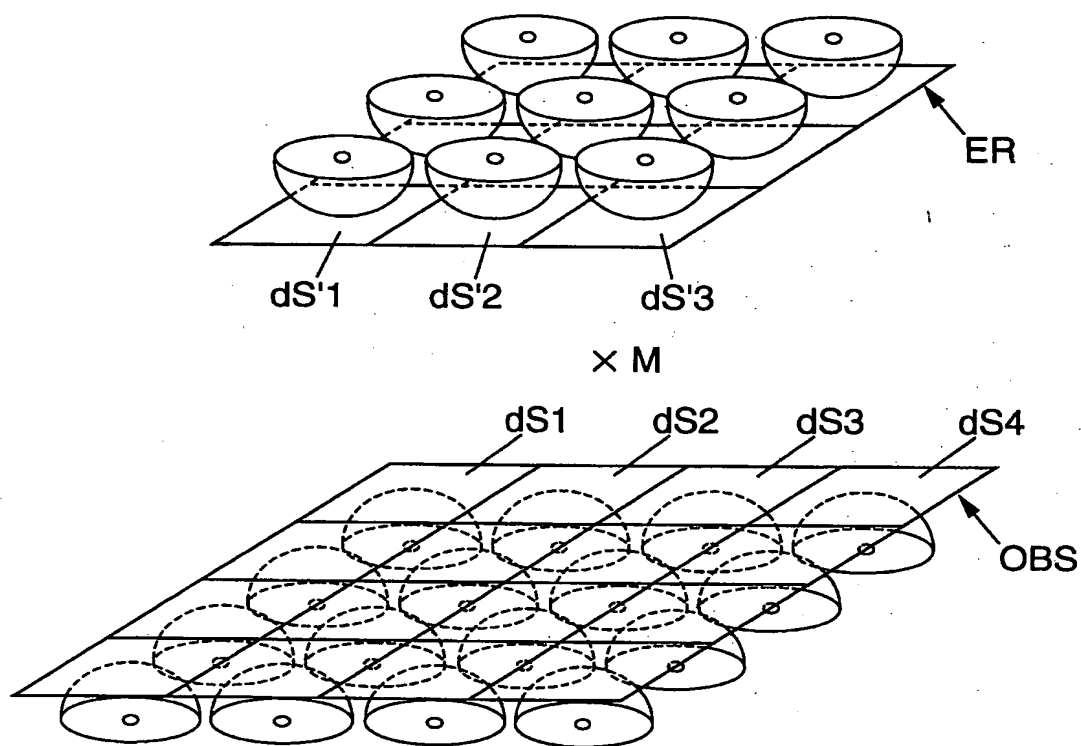


FIG. 1A

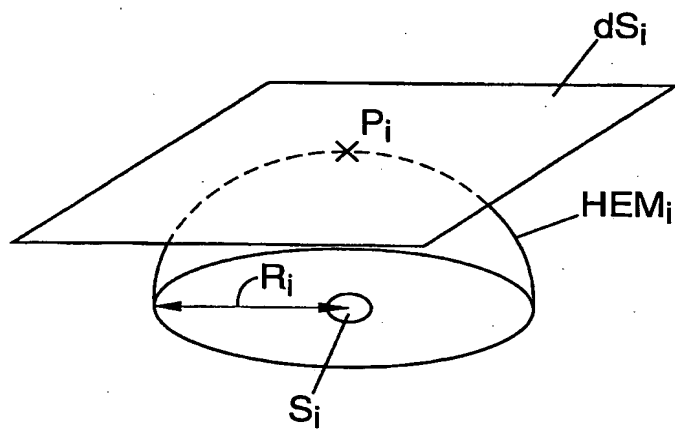


FIG. 1B

2/8

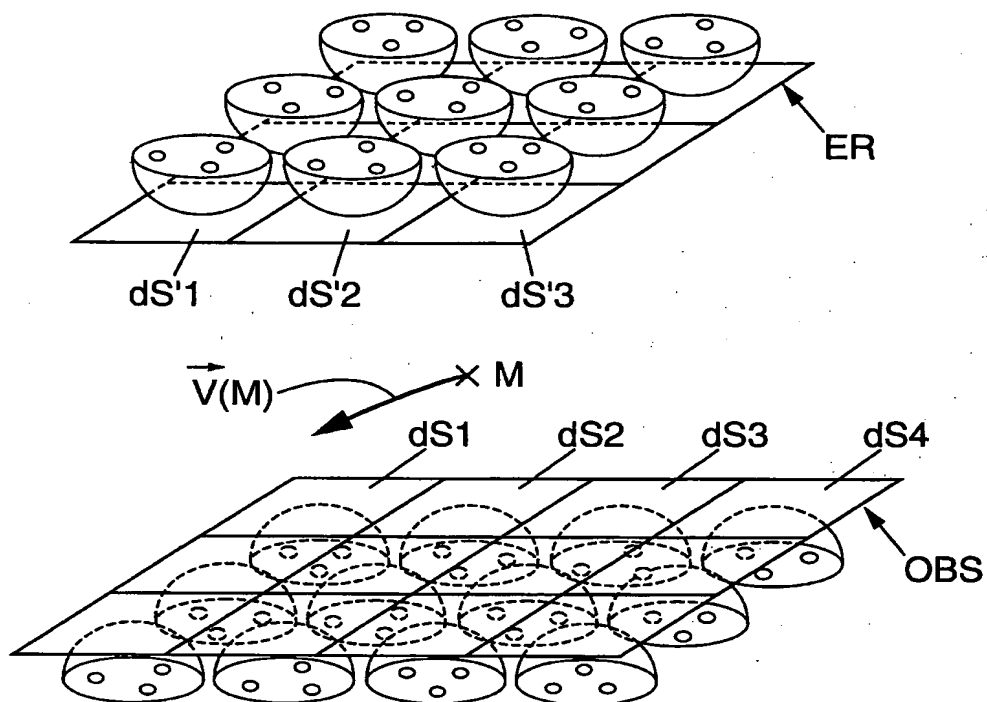


FIG. 2A

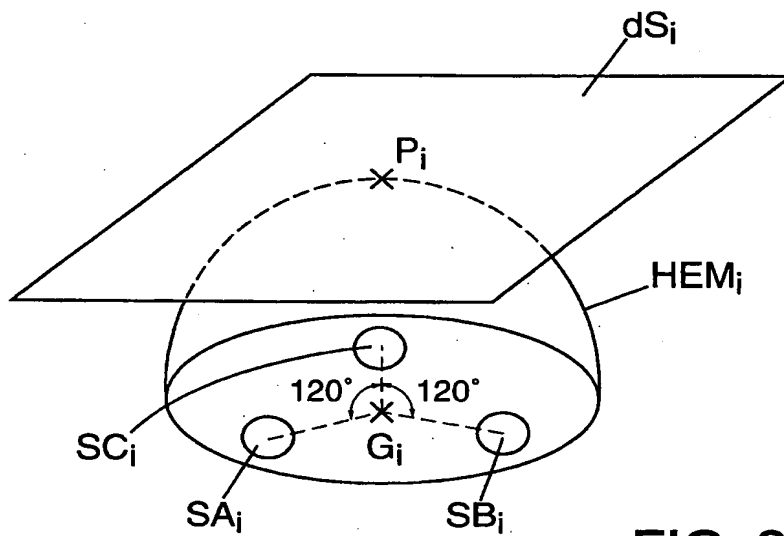


FIG. 2B

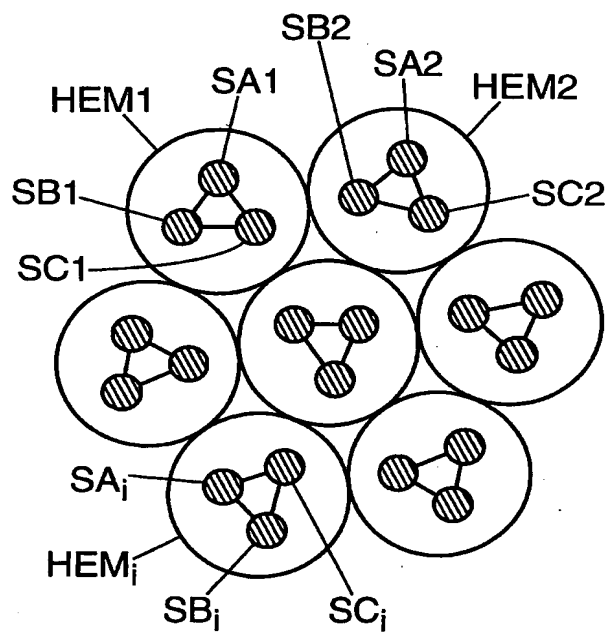
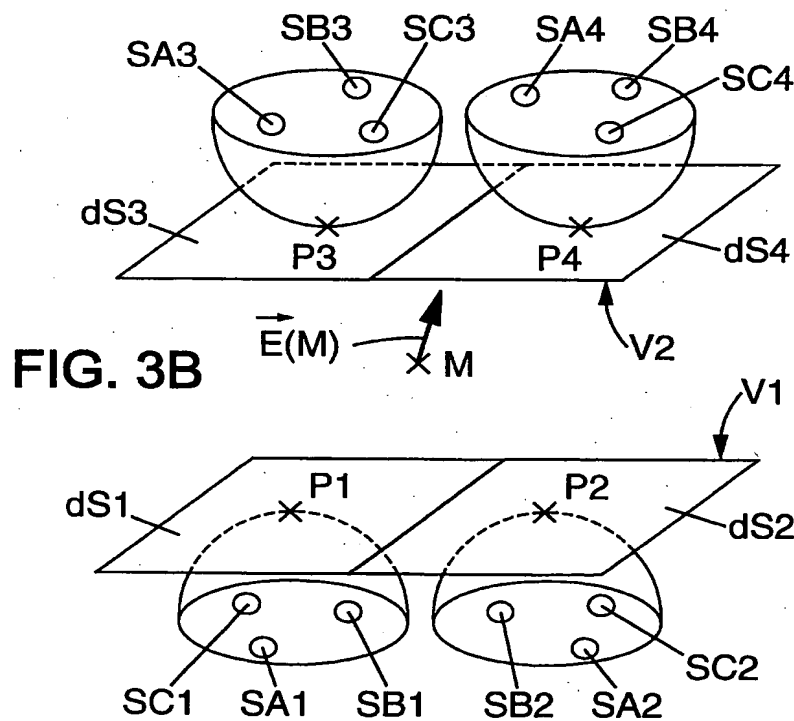
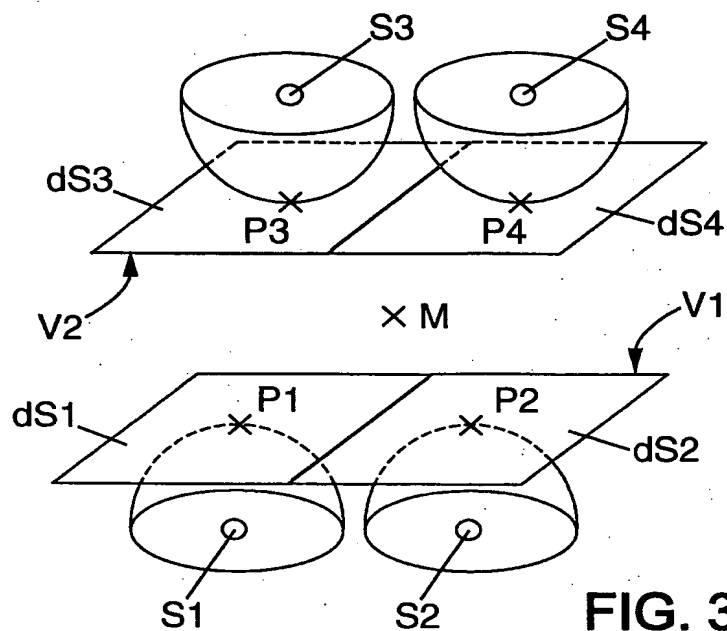


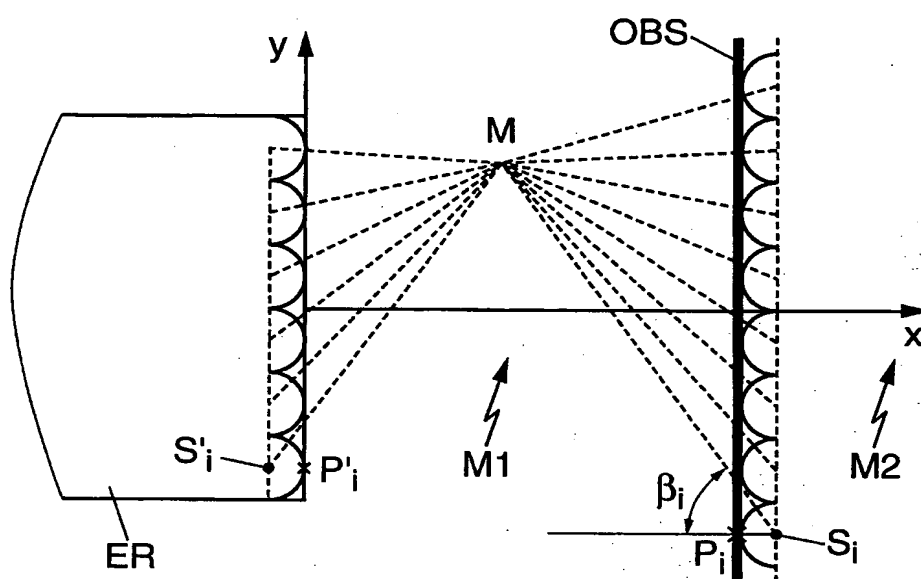
FIG. 2C



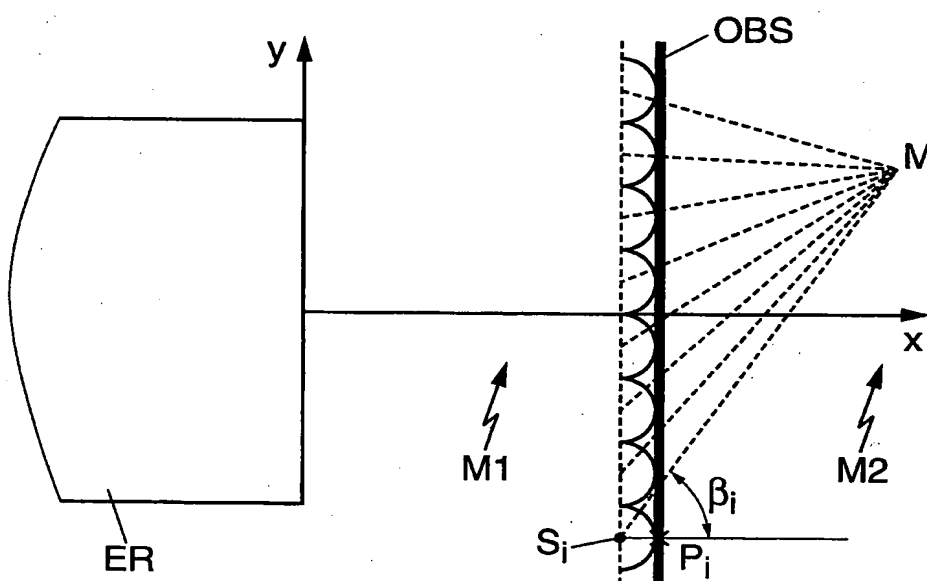
4/8



**5/8**



**FIG. 4A**



**FIG. 4B**

6/8

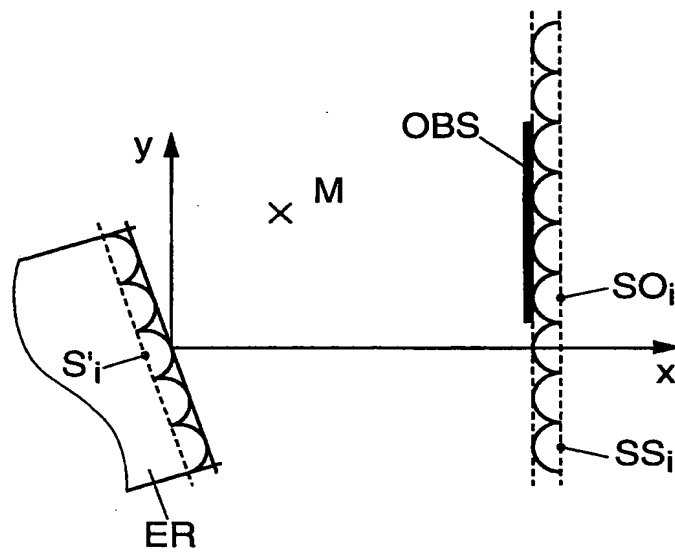


FIG. 5A

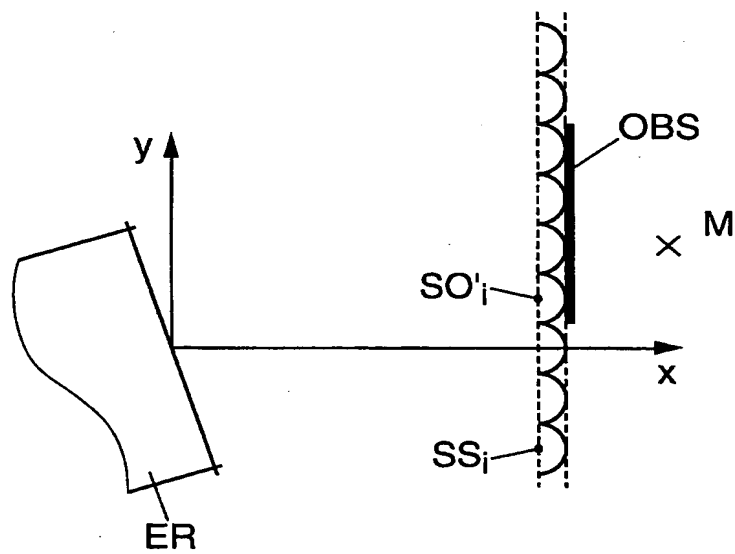


FIG. 5B

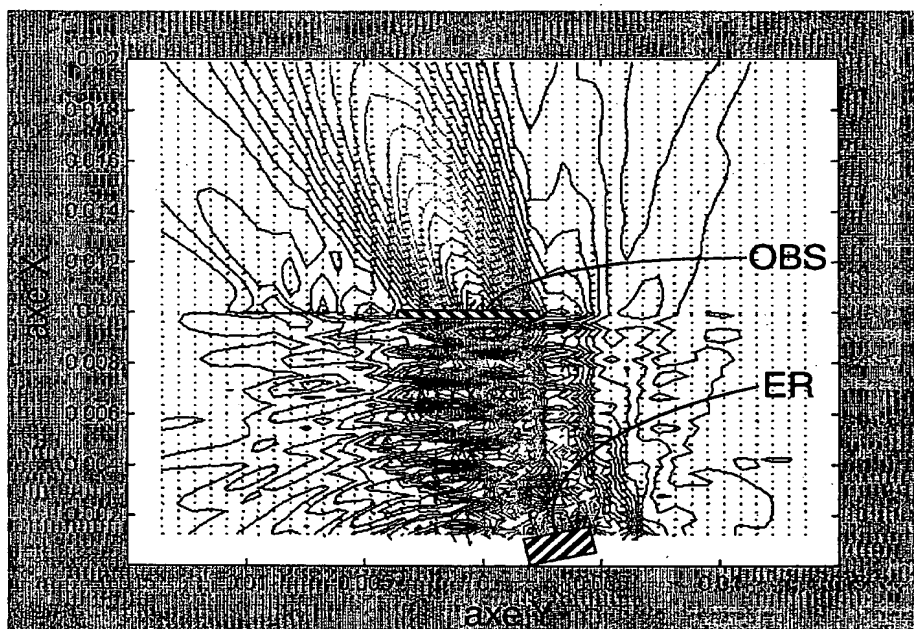


FIG. 5C

